

Association d'une culture de rente et espèces compagnes permettant la fourniture de services écosystémiques

Valantin-Morison M.¹, David C.², Cadoux S.³, Lorin M.¹, Celette F.², Amossé C.², Basset A.⁴

¹ UMR 211 Agronomie, INRA-Agro Paris Tech, Avenue Lucien Bretignière, F-78850 Thiverval-Grignon

² ISARA Lyon, Université de Lyon, 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07

³ CETIOM, Avenue Lucien Bretignière, F-78850 Thiverval-Grignon

⁴ Jouffray Drillaud, Station de la Vannelière, RD 347, 4 avenue de la CEE, F-86170 Cissé

Correspondance : Muriel.morison@grignon.inra.fr

Résumé

Dans un contexte de réduction de la dépendance de notre agriculture aux intrants, les associations temporaires de plantes compagnes pourraient présenter de nombreux intérêts : la réduction de certains bioagresseurs tels que les insectes ou les adventices, l'enrichissement du système de cultures en azote atmosphérique, l'augmentation de la qualité et la productivité de la culture de rente en place ou de la suivante. L'objectif de cet article est de présenter les services écosystémiques rendus, sur l'exemple du colza associé en début de cycle et sur le blé associé avec une légumineuse implantée en relais. Dans les deux cas, les biomasses ainsi que le taux de couverture des mauvaises herbes sont réduits par rapport au traitement culture seule. Concernant le gain en azote au printemps pour le colza, il atteint en moyenne 10kg/ha sur des essais non fertilisés avec une forte variabilité et pour les blés associés, le gain est uniquement pour la culture suivante, avec un bénéfice en moyenne supérieure de 50% par rapport au témoin. Les espèces de plantes compagnes les plus performantes pour rendre ces services sont le plus souvent des légumineuses et en mélange. Une réduction de 30kg/ha et parfois 60kg/ha de l'azote apporté, permet d'atteindre le même rendement qu'un colza seul. Les conditions de réussite de ces deux associations résident dans l'implantation du couvert.

Mots-clés : couverts associés, bioagresseur, azote, colza, blé, légumineuses,

Abstract: Ecosystem services permitted by intercropping of companion plant in annual crops

With the shift towards a reduced reliance on external inputs in agriculture, diversification of vegetation through companion mixing crop with annual crop could serve multiple purposes, including (i) regulating insect pest densities, (ii) reducing weeds, (iii) increasing nitrogen through fixation and (iv) improving yield and crop quality. The aim of this paper is to present the ecosystemic services for two examples: winter oilseed rape (WOSR) with companion plants and relay intercropped legumes cover crops undersown in winter wheat. For both examples, weed biomass and weed cover rate are reduced comparing to the sole crop. The benefit of nitrogen for the WOSR in spring is around 10kg/ha for 0N experiments and for wheat, the improvement of nitrogen uptake of the subsequent crop could achieve 50% more than the control. The most promising companion plants are often legumes and mixing species of legumes. A reduction of 30kg/ha and sometimes 60kg/ha in WOSR fertilisation permit to achieve the same yield than sole crop. The success of these companion plants in annual crops is based on the cover crops establishment.

Keywords: cover crops, pests, nitrogen, winter oilseed rape, winter wheat, legumes

Introduction

Les agricultures française et européenne sont à la croisée des chemins ; elles doivent allier productivité et qualité mais aussi respect de l'environnement et préservation des ressources. L'agriculture du XXI^{ème} siècle a plusieurs défis à relever : (1) produire des biens alimentaires et non alimentaires (énergie, produits dérivés de la chimie verte) pour une population en croissance dans un contexte de changement climatique, (2) réduire le recours et la dépendance aux intrants chimiques (fertilisation, pesticides), et aux énergies non renouvelables (phosphore, pétrole) dans un contexte de changement climatique, (3) préserver les ressources naturelles et protéger notre environnement. Les objectifs assignés aux systèmes de culture se complexifient et doivent concilier la quantité et la qualité produite, la réduction des impacts environnementaux et la robustesse face aux changements climatiques. Cela implique de repenser entièrement les systèmes de culture d'aujourd'hui : leurs objectifs, les pratiques qui en découlent, l'évaluation de leurs performances (Meynard et al., 2012), en mobilisant les services écosystémiques existant dans les agrosystèmes (Malézieux, 2012) mais aussi des pratiques agroécologiques telles que l'association végétale, le contrôle biologique des bioagresseurs et le recyclage des nutriments (Wezel et al., 2014).

Or en France, les systèmes de grandes cultures se sont simplifiés et ont particulièrement promu quelques espèces rentables telles que le blé, le colza, la betterave et le maïs, laissant sur le chemin de nombreuses légumineuses à graines ou fourragères (Meynard et al., 2013). L'augmentation des surfaces en céréales et oléagineux s'est traduite par une simplification et un raccourcissement des rotations (Schott et al., 2010), au détriment d'espèces jugées à plus faible rentabilité à court terme (Malézieux et al., 2009). Cette évolution, très consommatrice en intrants que ce soit pour la fertilisation ou la protection de la culture, engendre des dommages environnementaux non négligeables (Schott et al., 2010). Face à la pression sociale et environnementale, les pouvoirs publics se sont engagés à faire évoluer les modes de production via des législations telles que les directives nitrates, la plan Ecophyto ou plus récemment le projet agroécologique pour la France. L'une des hypothèses couramment avancées en agro-écologie est qu'en augmentant la biodiversité végétale cultivée, par exemple via des peuplements plurispécifiques, les régulations et les interactions biologiques pourront être remobilisées au service de systèmes de cultures moins dépendants des intrants de synthèse, aux performances économiques et environnementales accrues. Dans un agrosystème, l'augmentation de cette biodiversité peut être introduite dans le temps via la diversification des rotations, ou dans l'espace via des peuplements plurispécifiques ou couverts plurispécifiques (i.e. la présence simultanée de différentes espèces sur un même espace (Vandermeer et al., 1998). Il existe une multitude de peuplements plurispécifiques du type cultures de vente associées (ex. mélange blé pois), combinaison d'une culture de vente à une plante de service (ex. mélange colza légumineuses), mélange d'espèces en interculture (ex. couverts avoine-vesce) ou pour une utilisation fourragère (ex. mélange graminées et légumineuses). Dans cet article, on s'intéressera aux couverts dans lesquels une culture de rente est associée, pendant tout ou une partie de son cycle, à une plante compagnes ou de service non récoltée. Les associations avec des plantes compagnes se distinguent selon plusieurs catégories :

- Semis simultané avec la culture de rente ; la plante compagne meurt ou est détruite avant récolte de la culture principale,
- Association relais où une espèce (ou un mélange) est semée en cours de cycle de la culture de rente, le bénéfice attendu étant principalement pour la culture suivante,
- Associations (semi)permanentes : semis direct de la culture de rente dans un couvert (semi)permanent non récolté car peu développé en hauteur et/ou régulé chimiquement.

De nombreux exemples existent et sont illustrés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Exemples d'associations avec des plantes de service, compagnes d'une culture de rente. En bleu exemples développés dans la suite de l'article.

Services attendus	Positionnement dans le temps		
	Associations temporaires		Associations permanentes
	Semis simultané d'une plante compagne	Semis en relais dans une culture de rente	Semis direct sous couvert vivant
Couverture du sol et contrôle des adventices	<p>Colza associé à des plantes gélives</p> <p>Orge associé à des trèfles rouges et trèfles blancs (Kwiecilska-Poppe et al., 2009)</p> <p>Maïs associé à des légumineuses (Ghosheh et al., 2004)</p> <p>Pommes de terre, soja, maïs associés au seigle et à la vesce en bio (Uchino et al., 2009)</p>	<p>Blé bio associé en relais avec des légumineuses (Amossé et al., 2013, Thiessen Martens et al., 2005) ou conventionnel (Blaser et al., 2011)</p> <p>Maïs avec association printanière (Abdin et al. 1997 et 2000)</p>	<p>Blé en SCV (Carof et al., 2007)</p> <p>Plantes de couverture sous bananier (Duyck et al., 2011)</p> <p>Maïs dans un couvert de vesce velue, de trèfle (Ilnicki et al., 1992)</p> <p>Blé dans un couvert de légumineuses (Hiltbrunner et al., 2007, 2008)</p>
Piéger l'azote et le restituer au système	<p>Colza associé à des plantes gélives</p> <p>Maïs associé à des légumineuses</p>	<p>Blé associé en relais à une légumineuse (Hiltbrunner et al., 2007, Bergkvist et al. 2003)</p> <p>Tournesol associé à des légumineuses (Kandel et al., 2000, 1997)</p> <p>Féverole, lupin, pois, avoine, mélange pois-avoine associé en relais à un mélange trèfle-graminées (Hauggaard-Nielsen et al., 2012)</p>	<p>Blé dans un couvert vivant permanent de trèfles (Thorsted et al., 2006)</p> <p>Chou et brocoli dans un couvert vivant permanent de légumineuses (Thiérault et al., 2009)</p> <p>Maïs dans un couvert vivant de trèfles (Ilnicki et al. 1992)</p>
Contrôler les ravageurs	<p>Colza associé à des plantes gélives</p> <p>Aubergine associé au trèfle incarnat (Hooks et al., 2013)</p>	<p>Chou ou brocoli avec trèfle (Costello et al., 1994)</p> <p>Poireau avec trèfle (Theunissen et al., 1996, 1998)</p>	<p>Plantes de couverture sous bananier (Duyck et al., 2011)</p>
Favoriser les cultures auxiliaires de pollinisateurs	<p>Colza féverole (Jamont, et al., 2013)</p> <p>Parasitoïdes de la mouche du chou dans du colza de printemps (Hummel et al., 2010)</p>		

Les services écosystémiques attendus de la plante compagne sont la réduction de certains bioagresseurs tels que les insectes : Pucerons du brocoli (Costello, 1994), du chou blanc, (Theunissen, 1995) ou telles que les adventices : cas des légumineuses en relais dans du blé (Hiltbrunner, 2007; Amossé et al., 2013 ; Ilnicki et Enache, 1992), l'enrichissement du système de cultures en azote

atmosphérique (cas de la fixation symbiotique par des légumineuses compagnes) ou les relations de compétition/facilitation augmentant la qualité et la productivité de la culture de rente. On peut citer par exemple l'effet de l'espèce compagne sur la croissance du système racinaire (Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005), sur la disponibilité en eau et en nutriments (Thorsted, 2006), sur la diminution des quantités d'azote lixiviées (Liedgens et al., 2004), sur la réduction du stock semencier d'adventices ou encore sur l'amélioration de la structure du sol. Néanmoins, la gestion et le pilotage de ces interactions biologiques constituent une délicate alchimie, qui consiste à assurer la complémentarité des espèces pour que la croissance des unes ne se fasse pas au détriment de l'autre. Les sources de variation de la réponse des associations étant multiples, il demeure important de comprendre les conditions de réussite ou d'échec de ces innovations agroécologiques (sol, climat, modalité de semis, travail du sol, fertilisation, choix variétal, etc).

L'objectif de cet article est de présenter par l'intermédiaire de deux exemples d'associations de plantes compagnes d'une culture de rente, les services écosystémiques attendus et obtenus, et les éléments clefs de leur conduite culturale, facteurs de leur réussite.

1. Présentations brèves des success story retenues

1.1 Positionnement et définitions

Les deux exemples contrastés de plantes compagnes retenus dans cet article sont : (i) le colza associé à des plantes de service gélives, seules ou en mélange, qui sont amenées à disparaître pendant l'hiver, et (ii) les légumineuses fourragères semées en relais sous couvert de blé conduit en agriculture biologique (Tableau 1). Ce sont des associations temporaires, au sens où elles partagent seulement une partie du cycle de la culture de rente.

1.2 Les services attendus

1.2.1 Le colza associé à des espèces compagnes

Des associations temporaires d'espèces avec le colza sont étudiées depuis 2008 à la fois par le Cetiom, de nombreuses chambres d'agriculture, des coopératives, des semenciers, et l'INRA. Les espèces compagnes testées sont souvent des légumineuses gélives afin d'éviter la compétition sur la nutrition azotée du colza et de restituer de l'azote au système.

Cinq hypothèses de services écosystémiques rendus par l'utilisation de plantes de service peuvent être mises en avant dans cet exemple.

- La présence de plantes de service associées au colza en automne peut exercer une concurrence vis-à-vis des adventices. En effet, la pression des adventices constitue un facteur limitant la croissance du colza en automne (Valantin-Morison et al., 2008) et contraint à l'utilisation quasi-systématique d'herbicides préventifs « post-semis / prélevée » (Primot et al., 2006). La présence de plantes compagnes, en exerçant une compétition accrue sur les ressources (eau, lumière et nutriments), pourrait limiter le développement des adventices et diminuer le recours aux herbicides.
- L'azote minéral fixé par les espèces compagnes et/ou assimilé dans le cas des légumineuses pourrait constituer une source d'azote pour le système de culture et potentiellement disponible pour le colza lors de la décomposition des résidus au printemps suivant. Plusieurs études ont montré l'intérêt d'implanter des légumineuses en interculture pour fournir de l'azote à une culture de printemps, qu'elles soient incorporées au sol ou bien laissées sous forme de mulch (Parr et al., 2004 ; Teasdale, 2008)
- La présence de plantes de service peut réduire les attaques d'insectes en automne, soit par effet de dilution de la plante hôte, par effet de barrière, ou par perturbations olfactives et

visuelles, etc. Ces effets sont néanmoins très peu étudiés sur le colza et parfois contradictoires sur d'autres brassicacées (Costello 1994 ; Theunissen et al., 1997 et 1995).

- La présence de plantes de services peut également attirer certains auxiliaires des cultures. La féverole, grâce à ces nectaires extra-floraux favorisent le développement des parasitoïdes pendant l'automne (Hummel et al., 2010).
- Enfin, les associations d'espèces pourraient améliorer le fonctionnement rhizosphérique (aspects physiques, chimiques et/ou biologiques). La disponibilité des éléments peu mobiles comme le phosphore peut être aussi améliorée par la présence d'autres espèces. Par ailleurs, l'insertion de plantes de services est susceptible d'améliorer le potentiel mycorhizogène des sols. Les symbioses entre plantes cultivées et mycorhizes permettent d'améliorer l'accès aux ressources du sol et la résistance à des stress biotiques et abiotiques. De plus, par la qualité des composés rhizodéposés par ses racines, l'insertion d'une légumineuse de service peut avoir un effet sur la qualité de la matière organique et sa dégradabilité. Ces effets peuvent être différents avec un blé ou avec un colza (Melissa et al., 2013). Ceci peut permettre une réduction des apports d'engrais minéraux, et indirectement des émissions de GES et des coûts énergétiques.

1.2.2 Semis de légumineuses sous couvert de blé

Plusieurs travaux menés en France et en Europe ont porté sur l'insertion de légumineuses fourragères au sein de rotations céréalières. L'exemple décrit illustre l'insertion en relais d'une légumineuse fourragère dans une culture de blé d'hiver conduite en AB.

Plusieurs services sont visés dans cet exemple :

- L'implantation d'une espèce compagne en relais a pour but de limiter la compétition interspécifique durant la phase d'association afin de garantir les performances du blé. Plusieurs travaux s'intéressant aux associations simultanées (Carof et al., 2007 ; Hiltbrunner et al., 2008) ont clairement mis en évidence une compétition sur les ressources minérales et hydriques en début de cycle qui peut être limité par le décalage de semis de l'espèce compagne,
- En AB où les ressources en azote organique sont limitées (cas des systèmes céréalières sans élevage) et/ou coûteuses, l'insertion d'une légumineuse a pour but d'enrichir en azote le système sol-plante. Cet enrichissement doit alors contribuer à la nutrition azotée des cultures suivantes
- La mise en place d'une espèce fourragère en relais peut permettre un contrôle des adventices, au cours de l'association mais aussi durant l'interculture. Ce service est particulièrement apprécié dans des conditions biologiques (Hartl, 1989 ; Becker et Leithold, 2008) en l'absence de désherbage chimique.
- Les bénéfices attendus de ces espèces compagnes doivent être appréhendés non seulement sur la culture de blé associé mais aussi sur la culture suivante et sur l'état de la parcelle (degré de salissement, fertilité du sol).

La plupart des études sur les associations relais entre une céréale et un couvert de légumineuse ont été menées en agriculture conventionnelle (Vyn et al., 2000 ; Thiessen Martens et al., 2001; Mutch et al., 2003 ; Blaser et al., 2006 ; Blackshaw, 2010 ; Bergkvist, 2003 ; Blaser et al., 2011). Les conditions de production biologique présentent des particularités qui mettent en évidence les services que doit assurer l'espèce compagne au regard des déficits d'azote très fréquents et d'un fort risque d'infestation par les adventices. D'autre part, l'effet d'une même espèce de couvert de légumineuse associée en relais à un blé sur les performances finales de la culture suivante peut varier selon les conditions (type d'espèce, conduite culturale).

2. Les services écosystémiques mesurés

2.1 *Le colza associé à des espèces compagnes*

2.1.1 Les dispositifs mis en œuvre

Depuis 2009, des dispositifs expérimentaux qui testent des associations colza légumineuses ont été mis en place par diverses institutions : CETIOM, INRA, Chambres d'agriculture, coopératives agricoles et semenciers (Jouffray Drillaud, Sem-Partenaires, Caussade semences notamment). Nous présentons ici une synthèse des résultats expérimentaux marquants afin de quantifier les services écosystémiques assurés et identifier les espèces ou mélanges d'espèces les plus performantes.

Dans ces différents essais, les espèces testées étaient très souvent des légumineuses conduites seules (lentille fourragère, trèfle incarnat, trèfle blanc, trèfle d'Alexandrie, féverole, pois fourrager, fenugrec, gesse, vesce commune, pourpre...), ou en mélange (Lentille-Féverole, lentille-gesse-fenugrec, vesce pourpre-vesce commune-trèfle d'Alexandrie, vesce-féverole-trèfle d'Alexandrie...).

- **Des essais multi-locaux pour identifier la robustesse de la réponse et les conditions de milieu qui permettent d'atteindre les Services attendus.**

Les dispositifs expérimentaux, réalisés en parcelles agricoles ou en stations expérimentales CETIOM et CA, se répartissent dans 7 régions: l'Ile de France, la Bourgogne, Les Pays de Loire, Le Poitou-Charentes, La Picardie, le Centre, la Lorraine et sont au nombre de 20. Sur chacun de ces 20 sites, plusieurs types d'associations et plusieurs niveaux de fertilisation ont été testés.

Sur l'ensemble des essais suivis par l'INRA, les chambres d'agriculture et le CETIOM, l'implantation a été réalisée après travail du sol ou en semis direct (Centre), en même temps que le colza, en additif au colza (la densité de colza est identique dans les modalités associées et non associées). Un témoin colza seul était implanté sur chaque essai, disposé en bandes ou en blocs randomisés; la fertilisation azotée était conduite à l'optimum a priori sur le témoin (dose X) et réduite sur les associations (dose X-30 ou X-60). Des modalités non fertilisées (témoin et colza associé) ont complété certains essais. Le protocole de suivi des dispositifs expérimentaux consistait à quantifier la croissance et la quantité d'azote absorbé par la culture, la compétition de l'espèce associée, l'enherbement pendant l'automne et sur quelques essais les attaques d'insectes d'automne (Charançons du bourgeon terminal, grosses altises) et enfin les rendements de colza.

- **Un essai analytique pour comprendre comment certaines espèces compagnes contribuent au fonctionnement du couvert associé.**

Entre 2012 et 2014, des essais analytiques, faisant varier à la fois les espèces de plantes compagnes et la disponibilité en azote au semis, ont été implantés dans les Yvelines sur une station expérimentale

2.1.2 Etouffement des adventices

Premier diagnostic en parcelles agricoles multi-locales toutes espèces compagnes confondues

Plusieurs mesures ont été réalisées pour étudier l'effet des couverts associés au colza sur les adventices: taux de levée des adventices, pourcentage de couverture du sol par les adventices en entrée d'hiver, biomasse des adventices en entrée d'hiver et à floraison. Les premiers enseignements de ces dispositifs multi-locaux sont :

1) Dans les situations à fort salissement initial (ex. forte présence de géranium précoce dans les essais CETIOM du Centre), aucune différence de taux de levée d'adventices n'a été mise en évidence entre les colzas seuls et les colzas associés à des légumineuses, que ce soit dans les essais CETIOM et INRA/CA.

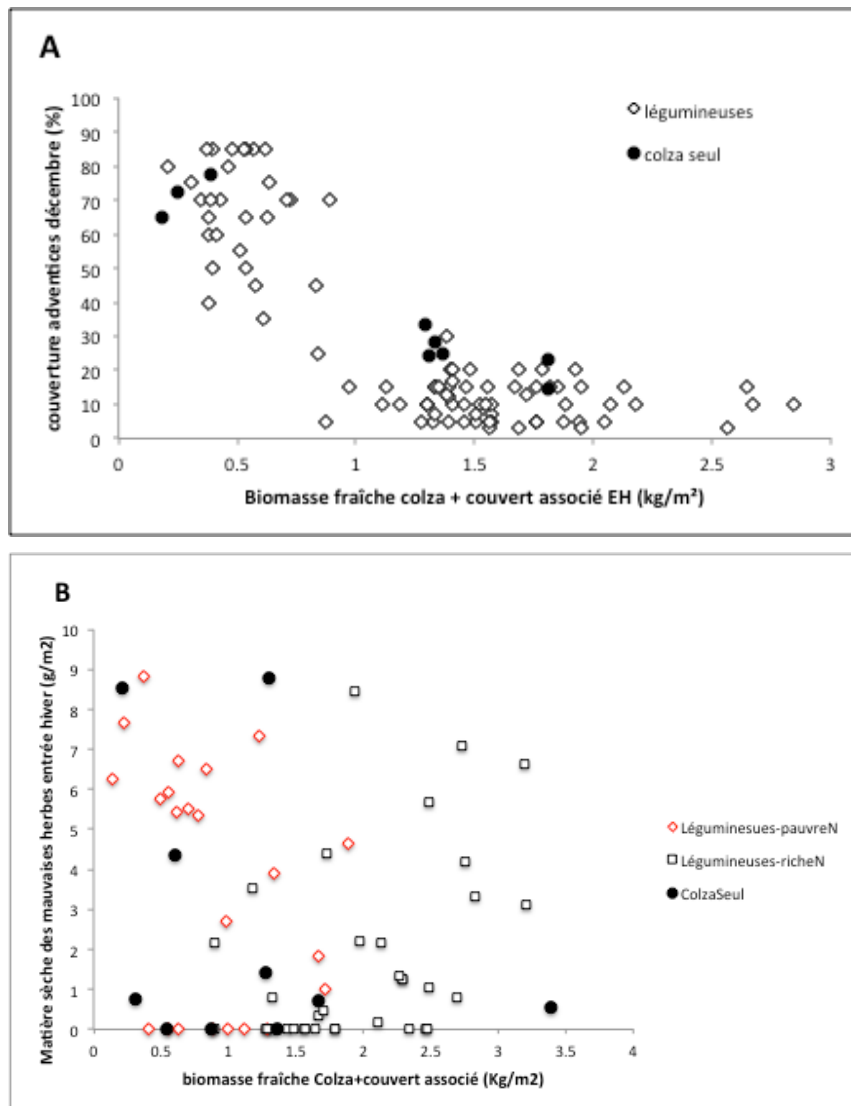


Figure 1 : Pourcentage de couverture des adventices, en fonction de la biomasse du colza et du couvert associé en entrée d'hiver (A) 1 point correspond à une mesure; abondances des mauvaises herbes en fonction des biomasses de colza et de plantes compagnes – distinction des milieux riches en azote, où plus de 90kg/ha d'azote étaient disponible au semis de colza (B) des milieux pauvres; 1 point correspond à une moyenne de mesures par sites.

2) En revanche, les couverts associés ont un effet significatif sur la réduction des taux de couvertures et de la biomasse d'adventices à la fin de l'automne (Figure 1a et b). Cet effet est lié à la biomasse produite par l'association colza-légumineuses (Figure 1a); une biomasse fraîche totale du couvert dépassant 1.5kg/m² en entrée de l'hiver permet de maintenir le pourcentage de couverture des adventices sous la barre des 30%.

3) L'influence de l'azote disponible dans le milieu lors du semis impacte l'effet compétition à l'égard des mauvaises herbes : Lorsque le milieu est riche en azote, l'effet compétition est surtout assuré par la biomasse de colza, mais à l'inverse quand le milieu est plus pauvre, l'effet compétition est assuré par le couvert plantes compagnes et colza. C'est pourquoi, la relation négative entre la biomasse fraîche du couvert colza et plantes compagnes et la biomasse de mauvaises herbes n'est plus significative lorsque l'on dépasse 90kg N/ha disponible entre le semis et l'entrée de l'hiver (Figure 1b).

Il semble alors qu'en situations de faibles disponibilités en azote du milieu, la présence d'un couvert associé apporte un supplément d'efficacité sur le taux de couverture d'adventices et la biomasse (à une même biomasse de couvert végétal, les colzas associés présentent des pourcentages de couverture

d'adventices inférieurs aux colzas seuls) ce qui pourrait s'expliquer par une complémentarité de port des plantes.

- **Quelles sont les espèces ou mélange qui tirent leurs épingles du jeu ?**

Lorsque l'on essaie d'identifier les espèces de plantes compagnes les plus performantes pour assurer une compétition à l'égard des mauvaises herbes, ces essais multi-locaux ne donnent pas de réponses très nettes. En effet, le ratio de mauvaises herbes est significativement réduit pour atteindre environ 40% mais avec une variabilité entre sites et années très importante, empêchant d'identifier une espèce, plus performante que les autres (non illustré).

En revanche sur un dispositif analytique en bloc randomisé, le ratio de biomasse de mauvaises herbes par rapport au colza seul peut être relativement élevé et atteindre 90% pour la Gesse mais n'atteindre que 40% pour les mélanges (Figure 2), montrant ainsi que les mélanges et la lentille permettent de réduire de manière significative la biomasse de mauvaises herbes.

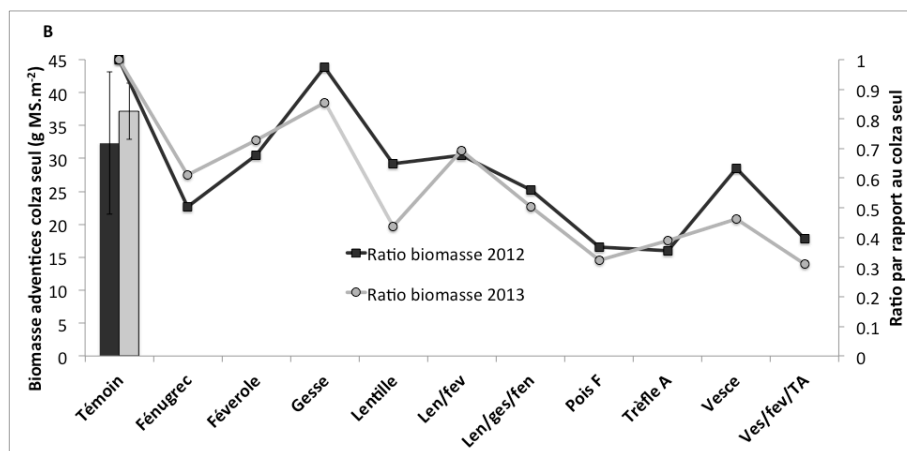


Figure 2 : Biomasse et Ratio de biomasse de mauvaises herbes par rapport au même colza seul sous différentes plantes compagnes. Dispositif expérimental analytique en blocs randomisés sur la station expérimentale de Thiverval-Grignon.

2.1.3 Nutrition azotée

L'un des effets attendus de l'association de légumineuses au colza est l'introduction d'azote symbiotique dans la parcelle. La part pouvant être disponible pour la culture du colza a été estimée dans plusieurs essais.

Dans les modalités fertilisées des essais l'écart moyen d'azote contenu dans les parties aériennes au stade d'accumulation maximale d'azote (G4) est en moyenne de 15 kg/ha en faveur des colzas seuls (non illustré). Le colza seul étant fertilisé à la dose X et les couverts associés des doses allant de X-80 à X-30, on peut considérer que l'effet des couverts associés a permis de compenser en partie la réduction de fertilisation ; environ 15 kg/ha au maximum, sachant qu'une partie des 30kg/ha supplémentaires apportés au colza seul a pu être perdu ou organisé dans le sol). Dans les modalités non fertilisées, les colzas qui ont été associés à des légumineuses contiennent en moyenne 8.3 kgN/ha de plus que les colzas seuls (année 2012, Figure 3) et 11,2kg/ha (année 2010, Figure 3). L'effet est en revanche négatif et significatif pour les colzas qui ont été associés à des non légumineuses ; ils contiennent en moyenne 18.2 kgN/ha de moins que les colzas seuls. Dans tous les cas, les écarts observés sont indépendants de la quantité d'azote contenu dans les parties aériennes des couverts associés en entrée d'hiver (Figure 3).

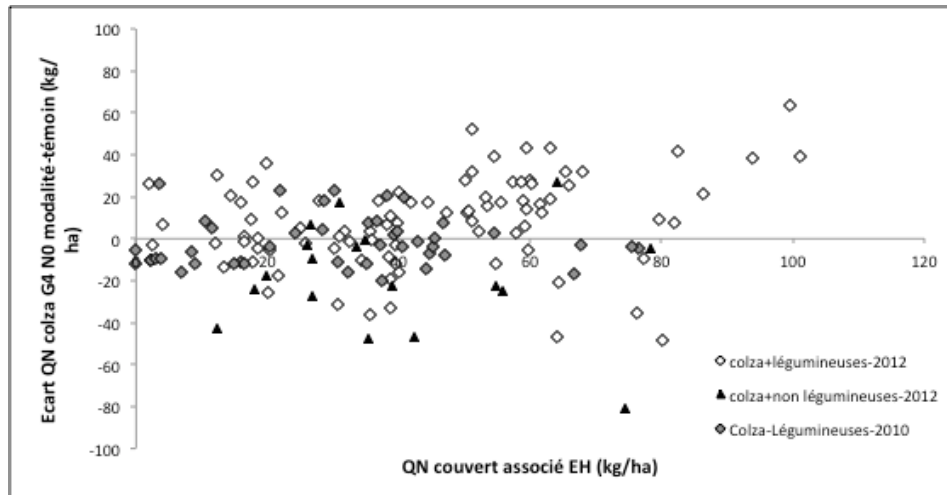


Figure 3 : Azote contenu dans les parties aériennes du colza au stade G4 dans les modalités non fertilisées, exprimé en écart au témoin colza seul, en fonction de la biomasse du couvert associé en entrée d'hiver. 1 point correspond à une mesure.

Des travaux en cours, à base de marquage au N15 et de modélisation tentent de comprendre les mécanismes en jeu pouvant expliquer cette variabilité. En effet, les conditions de destruction (précoce ou tardive) et les conditions météo du printemps qui suit le gel des espèces compagnes interagissent avec l'état des couverts avant destruction et influence le recyclage de l'azote (quantité et période). Là aussi, pour identifier les traits fonctionnels qui assurent ce service, une analyse des processus de décomposition interspécifique est en cours

2.1.4 Réduction des attaques d'insectes

Les essais du CETIOM ont permis de mettre en évidence l'effet significatif des couverts associés, et en particulier de la féverole, sur la réduction des attaques d'altises et des dégâts de charançons du bourgeon terminal - CBT- (non montré). L'effet de la biomasse du colza et du couvert a été mis en évidence sur le pourcentage de plantes buissonnantes à floraison lié aux attaques de CBT (Figure 4).

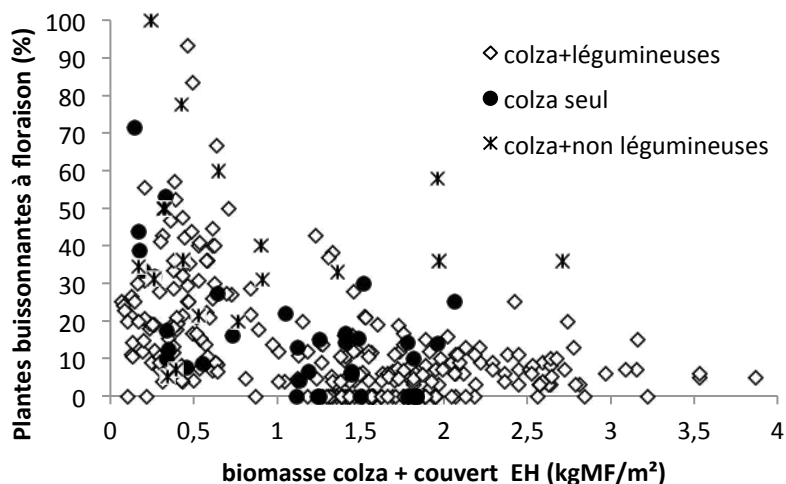


Figure 4 : Pourcentage de plantes buissonnantes à floraison, utilisé comme indicateur de dégâts des larves de CBT, en fonction de la biomasse de colza et de couvert associé en entrée d'hiver (EH). 1 point correspond à une mesure.

En deçà de 1.5 kg/m² environ de biomasse verte, les pourcentages de plantes buissonnantes peuvent être très élevés, que le colza soit seul ou associé. Au-delà, les dégâts sont beaucoup plus limités. Par ailleurs, la superposition des points des colzas seuls et des colzas associés suggère un effet substitutif de la biomasse du colza par celle du couvert associé. Les couverts associés pourraient donc être particulièrement intéressants dans les situations où il est difficile d'obtenir des biomasses de colza seul de 1.5 kg/m² en entrée d'hiver. Sur les grosses altises d'hiver, les essais réalisés en Poitou-Charentes entre 2010 et 2011 ont montré une réduction significative du nombre de larves d'altises dans les pétioles de colza en sortie d'hiver (non illustré).

2.1.5 Amélioration du rendement

Dans les essais multilocaux, l'écart de rendement entre colza seul et colza ayant été associé à des légumineuses est en moyenne de 1.1 qx/ha (non significatif) malgré une différence de fertilisation de 30kgN/ha (Essais CETIOM) à 60kg/ha (Essais INRA-CA) (Figure 6); ces écarts oscillent entre -1q/ha et +4q/ha ; seul le pois peut induire une réduction de rendement. Il semble donc que l'association avec des légumineuses fournisse un service supplémentaire à celui de l'azote qui compenserait largement un éventuel déficit d'azote. En revanche, l'association du colza à des non légumineuses conduit à des pertes significatives de rendement de 8.3 qx/ha en moyenne.

2.2 Le blé associé à des espèces compagnes implantées en relais

2.2.1 Les dispositifs mis en œuvre

Le programme de recherche lancé dès 2008 sur les systèmes d'association végétale céréales-légumineuses en AB est coordonné par l'ISARA Lyon en partenariat avec l'INRA (Grignon et Clermont), VetAgroSup et les sociétés Jouffray Drillaud (semencier) et Frayssinet (entreprise d'engrais organique). Six parcelles d'essais ont été suivies durant les saisons culturales 2008-2011 en s'intéressant non seulement à l'association mais aussi à la gestion du couvert en interculture et à son effet sur le maïs suivant. Ce travail a fait l'objet du doctorat de Camille Amossé (2013) et a conduit à plusieurs productions scientifiques et de vulgarisation. Quatre espèces compagnes ont été comparées à une situation de blé pur soit un blé associé à la minette (*Medicago lupulina* L. cv. Virgo Pajberg), la luzerne (*Medicago sativa* L. cv. Timbale), le trèfle violet (*Trifolium pratense* L. cv. Formica) et le trèfle blanc (*Trifolium repens* L. cv. Aberdaï). L'ensemble de ces essais n'ont pas été fertilisés afin d'étudier la contribution relative du couvert de légumineuse.

Plus récemment, quatre parcelles expérimentales ont été suivies durant les saisons culturales 2012-2014 comparant le blé pur à un blé associé à un trèfle violet (*Trifolium pratense* L. cv. Formica) ou à un trèfle blanc (*Trifolium repens* L. cv. Aberdaï) en situations fertilisée (fertilisation de couverture de 100 kg N.ha⁻¹) ou non. L'objectif était de connaître l'effet direct de la fertilisation de printemps sur le développement du couvert mais aussi sur les services assurés. Ce travail fait actuellement l'objet du doctorat de Sylvain Vrignon.

L'ensemble de ces travaux a été mené en région Rhône-Alpes au sein d'exploitations céréalières biologiques sans élevage. La répartition des parcelles a permis de tester les associations relais dans des conditions variées de climat tempéré et de sol. Les dates de semis du blé se sont échelonnées entre fin octobre et fin novembre. La variété de blé (cv. Lona) choisie est connue pour sa forte teneur en protéines (blé améliorant, hard wheat), et son adaptation à des conditions de nutrition azotées limitantes. Les couverts de légumineuses ont été maintenus sur la parcelle après la récolte du blé, jusqu'à la fin de l'hiver suivant où ils ont été détruits par labour, neuf à douze semaines avant le semis de la culture suivante. Sur les quatre parcelles suivies entre 2008 et 2011, la culture suivante a été un maïs implanté en avril. Depuis 2012, les couverts de légumineuses ont été détruits selon la volonté de l'agriculteur à semer une culture d'hiver ou de printemps. En 2013-14, l'association en relais a été comparé à des associations de semis simultanés à l'automne des blés et des trèfles. Le dernier

désherbage mécanique du blé a été réalisé suite au semis des légumineuses sur tous les traitements dont celui en blé pur. Ce passage de herse-étrille a permis d'enfouir les légumineuses dans les premiers centimètres de sol.

2.2.2 Performances des cultures associées

En général, la biomasse aérienne des couverts est négligeable ($< 0,4$ t MS ha⁻¹) jusqu'à la montaison du blé (soit cinq semaines après le semis des légumineuses sous couvert) ce qui limite la compétition sur les ressources hydriques et minérales. Ce n'est qu'à partir de la période post-floraison que les espèces compagnes peuvent se développer notamment suite à un moindre ombrage. La dessiccation des feuilles de blé, au cours du remplissage des grains, a entraîné une augmentation de la quantité de rayonnement lumineux atteignant les légumineuses (Blaser et al., 2006). Les espèces se différencient dans leur développement, la minette, la luzerne et le trèfle violet se distinguent du trèfle blanc dont la biomasse est restée très faible (Figure 5). Leur croissance aérienne s'est alors accélérée durant cette phase de l'association. Au terme de l'association, la minette et le trèfle violet présentaient la plus forte biomasse aérienne (1.9 et 1.8 t MS ha⁻¹, respectivement) suivies de la luzerne (1.1 t MS ha⁻¹). Le trèfle blanc a conservé une faible biomasse sous couvert (0.7 t MS ha⁻¹) (Amossé et al., 2013).

La minette et le trèfle violet ont mieux supporté la compétition du blé que la luzerne et le trèfle blanc. Le port élevé de la luzerne ne semble pas lui avoir apporté d'avantage sous couvert du blé comparativement à la minette et au trèfle violet, aux ports plus bas. Enfin, la croissance naturellement lente du trèfle blanc a été pénalisée par l'ombrage du blé dans toutes les situations testées.

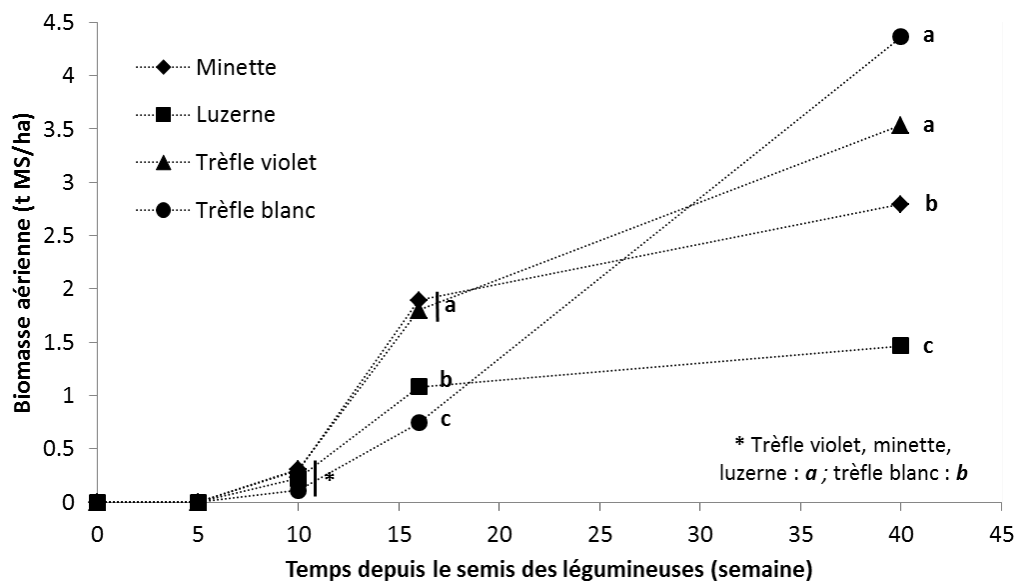


Figure 5: Dynamique de croissance aérienne (t MS ha⁻¹, lignes pointillées) des couverts de légumineuses du semis des espèces à la fin de l'automne (semaine 40 après semis des couverts). Moyenne des quatre sites suivis. Des lettres différentes à chaque date indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil alpha = 10%. Semaine 5 (S5) = stade 2 nœuds du blé (Zadoks 32) ; S10 = floraison du blé (Zadoks 69) ; S16 = récolte du blé ; S40 = fin de l'automne. (issu de Amossé et al., 2013).

La présence des couverts de légumineuses n'affecte pas le rendement du blé mais ne l'améliore pas non plus. A l'inverse, le développement de la minette et du trèfle violet en fin de cycle affecte dans les certains cas la teneur en protéines du blé biologique de 0,3% en moyenne. En revanche, luzerne et trèfle blanc n'ont pas eu d'effet dépressif sur la teneur en protéines des grains. On observe une compétition sur les ressources minérales et hydriques à partir du moment où la biomasse du couvert de légumineuses représente plus de 20% de la biomasse du blé (Amossé et al, 2013).

2.2.3 Contrôle des adventices durant l'association puis l'interculture

Durant la phase d'association, la présence des couverts n'a pas eu d'effet significatif sur l'augmentation de la biomasse des adventices ; la croissance des couverts n'était pas suffisante pour permettre une limitation du développement des adventices. En revanche, la présence des couverts a permis de diminuer significativement la densité des adventices, notamment des espèces printanières au moment de la récolte du blé (Blaser et al., 2011). Cette diminution a été observée pour les quatre espèces de légumineuses réduisant en moyenne de 52% la densité d'adventices observée sur le traitement témoin en blé pur. La compétition pour la lumière a dû être suffisante pour limiter l'émergence de nouvelles adventices à levée printanière ou indéterminée, entre la floraison et la récolte du blé associé (Kruidhof, 2008).

Ce n'est que durant l'interculture que le développement des couverts s'est avéré suffisant pour contrôler significativement la biomasse aérienne des adventices. La Figure 6 illustre le contrôle de la biomasse aérienne des adventices par les couverts comparativement au traitement témoin non désherbé entre la récolte du blé et la fin de l'automne. La biomasse d'adventices observée sur le traitement témoin était très largement supérieure à celle observée sur les traitements avec couverts. Les trèfles ont présenté un contrôle des adventices significativement plus important que la minette et la luzerne. Le retard de croissance du trèfle blanc à la récolte du blé a été largement rattrapé à partir du moment où la compétition du blé a disparu. A la fin de l'automne, les trèfles ont présenté la plus forte biomasse aérienne (Figure 6), ce qui explique leur meilleure efficacité dans le contrôle des adventices.

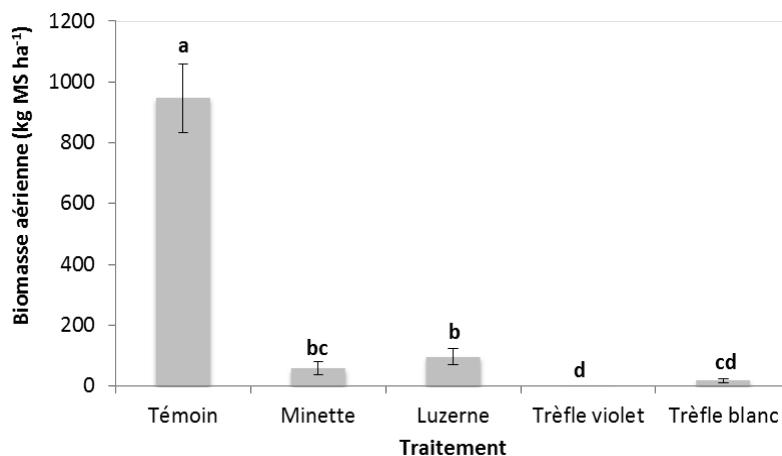


Figure 6 : Biomasse aérienne des adventices (kg MS ha⁻¹) à la fin de l'automne, 40 semaines après le semis des couverts de légumineuses et 24 semaines après la récolte du blé d'hiver. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne (n = 27). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil alpha = 10%.

A l'inverse, la présence de couverts durant l'interculture rend impossible la pratique de faux semis utile sur des parcelles très sales. Toutefois, il limite le stock semencier et donc le risque de développement important d'adventices sur la culture suivante.

2.2.4 Recyclage de l'azote

Le développement initial des légumineuses sous couvert favorise leur développement post récolte. Les légumineuses accumulent des quantités variables, mais non négligeables d'azote. Le trèfle blanc a accumulé la plus grande quantité d'azote dans ses tissus aériens alors que son développement a été limité durant l'association, suivis du trèfle violet, de la minette et de la luzerne (Figure 7). La part d'azote issue de la fixation symbiotique représente entre 76±8 % et 94±2 % (moyenne±erreur standard de la moyenne, n = 12) de la quantité totale d'azote contenue dans les parties aériennes des légumineuses, sans différence significative entre les espèces.

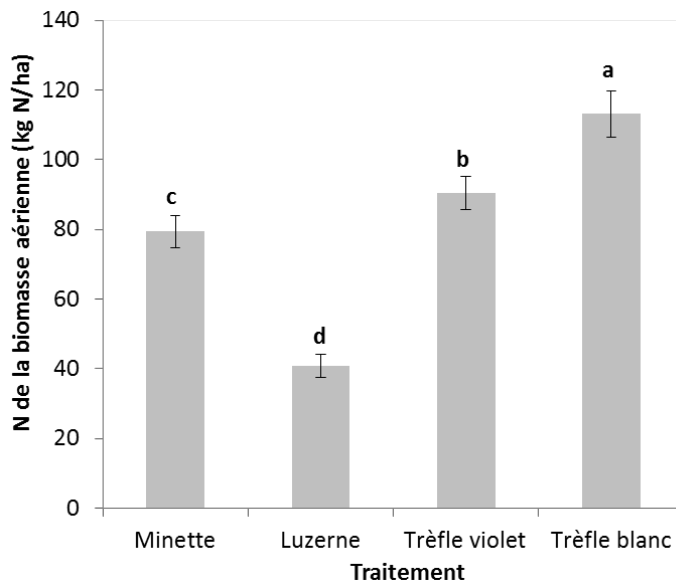


Figure 7 : Accumulation d'azote (N) dans les parties aériennes des couverts (kg N ha⁻¹) en semaine 40 après semis des couverts. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne (n = 12). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil alpha = 10%.

Selon les travaux de modélisation d'Amosse et al (2014), la présence des légumineuses durant l'interculture n'a pas d'influence sur les pertes hivernales d'azote, comparativement au traitement témoin au sol nu.

L'intérêt des couverts de légumineuses durant l'interculture réside principalement dans la restitution de l'azote accumulé à la culture suivante (Crews et Peoples, 2005). La quantité d'azote contenu dans les parties aériennes du maïs suivant à la récolte était en moyenne supérieure de 50% (+57 kg N ha⁻¹) par rapport au maïs témoin. Le rendement en grains s'est trouvé également fortement amélioré avec un gain moyen de 30%. L'enrichissement en azote du maïs et l'amélioration de son rendement en grains illustrent une forte minéralisation des résidus des couverts de légumineuses dans le sol en adéquation avec les besoins de la culture de printemps. Les gains économiques associés sont significatifs. Avec 21 kg N nécessaires à la production d'une tonne de grains de maïs, l'économie d'engrais organique représenterait 57 kg N ha⁻¹.

- **L'effet de la fertilisation sur l'association en relais**

L'apport d'azote en couverture (stade début tallage) affecte significativement le rendement du blé. Cet effet est très variable de 20 à 100% selon les situations culturales. A l'inverse, le développement renforcé du blé fertilisé intervient significativement sur la réduction de la croissance des couverts jusqu'à la récolte, supérieur à 30%. Toutefois, on note un fort effet de rattrapage des couverts post-récolte si leur développement est minimal (au moins supérieur à 0,5T.ha⁻¹). L'apport d'azote en couverture a tendance à favoriser le développement des adventices au préjudice du développement des couverts.

- **L'effet du type d'associations**

La comparaison des deux modes d'association en relais ou en simultané met clairement en évidence une différence dans la compétition sur les ressources. Dans le cas d'espèces à fort développement (trèfle violet ou luzerne), le mode d'association en relais limite la compétition imposée sur le blé. A l'inverse, des espèces à moindre développement sous ombrage (ex. trèfle blanc) n'affectent pas les performances de la culture de vente quel que soit le mode d'implantation. Dans les situations agronomiques favorables (faible salissement, forte fertilité du sol), l'association simultanée peut

conduire à un bon développement de ces espèces (ex. trèfle blanc) ce qui favorise leur fort développement en post culture.

3. Leur gestion et pilotage

3.1 *Le colza associé à des espèces compagnes*

3.1.1 Les conditions de réussite

La technique consistant à associer un couvert gélif au colza au moment du semis est récente. Les essais ayant pour but de mesurer les services rendus, ceux ayant porté sur la mise au point de la technique ainsi que les retours d'expérience d'agriculteurs ayant introduit cette innovation dans leur exploitation permettent de dresser un premier bilan des conditions de réussite.

Il est tout d'abord important de rappeler que cette technique a été testée au départ pour sa contribution potentielle à une stratégie globale, visant à améliorer la fertilité des sols et à rendre les systèmes de culture moins dépendants des intrants de synthèse. Les résultats présentés ci-dessus montrent que la technique peut apporter différents services, mais qui ne sont pas suffisants pour que la technique soit employée seule pour résoudre un problème ponctuel. Il est nécessaire de l'envisager comme un levier à effet partiel, qu'il faut combiner dans le cadre d'une stratégie cohérente. Par exemple, la technique peut montrer ses limites dans les situations à très fort enherbement en géraniums. La contribution du couvert associé ne suffit pas à réduire l'enherbement et les doses d'herbicides à appliquer pour contrôler la flore adventice sont nuisibles au développement du couvert associé. Dans ce cas, l'association est à proscrire ou à combiner à d'autres leviers ayant plus d'efficacité sur la réduction des levées de géraniums. Par exemple, la combinaison de semis direct sans flux de terre, évitant les levées précoces d'adventices, et d'association de plantes compagnes contribuant à réduire le taux de couverture des adventices a montré de meilleurs résultats d'enherbement et de rendement que les colzas seuls implantés avec travail du sol dans des essais du CETIOM situés dans des parcelles à risque important en géraniums. Enfin, en situations de fortes disponibilités en azote dans le milieu, la croissance du peuplement de colza est telle que les légumineuses sont fortement concurrencées et s'avèrent inutiles pour assurer le service de compétition vis à vis des mauvaises herbes. Dans ces situations, l'association avec des plantes compagnes est donc inutile.

Les résultats sur le service de maîtrise des adventices et des dégâts d'insectes, qui suggèrent un effet seuil de la biomasse de colza et du couvert associé en entrée d'hiver, renforce l'intérêt d'une implantation précoce en conditions favorables à une levée rapide. En plus de favoriser l'atteinte d'objectifs de production de biomasse d'au moins 1.5 kg/m² et donc de bénéficier des services associés, une implantation précoce favorise la floraison des légumineuses avant l'hiver, les rendant ainsi plus sensibles au gel.

En terme de choix des espèces à associer avec le colza, les non légumineuses sont à proscrire car elles ont montré le risque de concurrence du colza dans différents essais (Navette et Cameline en particulier) sans apporter de bénéfice supplémentaire sur les autres services (adventices et insectes). Le pois est la seule légumineuse testée qui semble concurrencer le colza dans certaines situations. Aucune légumineuse ou mélange de légumineuses ne semble supplanter les autres en terme de service rendu. La féverole semble plus efficace que les autres pour limiter les dégâts d'insectes et la lentille pour limiter le développement des adventices, mais les données sont trop variables et trop peu nombreuses pour être sûr qu'il n'y a pas de confusion d'effets. Les critères de choix des légumineuses peuvent donc se résumer à la recherche d'espèces et/ou variétés complémentaires, précoces et sensibles au gel de façon à éviter les applications d'herbicides pour les détruire. Mais au-delà du choix des légumineuses, le choix variétal de ces mêmes légumineuses est primordial. En effet les sélectionneurs peuvent proposer une large gamme de choix de variétés de légumineuses qui ne se comportent pas de la même manière : par exemple pour le trèfle d'Alexandrie, la variété Tabor est

mono coupe (aucune reprise en sortie de l'hiver) et très précoce (influence sur la biomasse d'automne) ; à l'inverse la variété Elite est tardive et multi coupes. Cette dernière ne répond donc pas aux attentes du couvert associé précoce, puisqu'elle produit peu à l'automne et présente une repousse importante. Il en va de même pour la vesce commune, pour laquelle une variété précoce, comme Spido offrira une biomasse importante avant l'hiver. Enfin, de même que l'on peut raisonner la complémentarité des espèces, on peut également raisonner la complémentarité des variétés.

3.1.2 Les témoignages de ceux qui ont essayé

Interview de Guillaume Houivet, chargé de projets productions végétales à la chambre d'agriculture de l'Indre :

« Dans le département de l'Indre, 5 à 10% des agriculteurs pratiqueraient la technique des couverts associés au colza. Les réussites concernent les agriculteurs qui étaient déjà dans une démarche d'évolution de leurs systèmes de culture, notamment par la diversification des rotations et le raisonnement de la réduction du travail du sol en vue d'améliorer la fertilité des sols. Dans ces situations, l'introduction de la technique des colzas associés à des couverts de légumineuses gélives a été vue comme un moyen de produire plus de biomasse pour stimuler la vie biologique du sol, de contribuer à la maîtrise du désherbage, et dans certains cas de réduire les quantités d'azote apportées. La plupart de ces agriculteurs sont satisfaits et continuent aujourd'hui d'associer le colza à des légumineuses gélives. La technique leur permet d'améliorer encore les performances dans des situations dites « saines ».

Des échecs ont aussi été rencontrés. Ils concernent principalement des agriculteurs qui ont introduit la technique de façon isolée dans des systèmes de culture peu diversifiés (rotations colza-blé-orge) pour résoudre des problèmes, notamment de pression adventices élevée. Couplé à un manque d'accompagnement, conduisant parfois à une absence totale de désherbage alors que le risque était élevé, ces situations ont souvent conduit à des pertes de rendement du colza. La technique des colzas associés change aussi la relation entre les agriculteurs et les conseillers. Le conseil se fait à des périodes différentes, en anticipation de façon à préparer des conditions favorables à la réussite plutôt qu'en réaction en cours de campagne. La question des couverts associés ouvre une discussion plus large sur le système de culture, la place du colza dans le système et la maîtrise de son implantation ».

3.2 Le blé associé à des espèces compagnes implantées en relais

3.2.1 Les conditions de réussite

Associer en relais un blé à des espèces compagnes produit potentiellement plusieurs services pour le système de culture. Les travaux conduits avec des légumineuses fourragères pérennes ont permis d'estimer leur rôle et leur degré d'importance (cf. plus haut). Cette pratique est particulièrement intéressante dans une perspective de réduction des intrants (herbicides/désherbages mécaniques ; fertilisation azotée) et ce à l'échelle de la rotation. Les expérimentations conduites ont également permis d'identifier des points clés à maîtriser pour optimiser ces services tout en limitant les contraintes pour l'agriculteur.

3.2.2 L'importance d'une implantation réussie

La capacité du couvert associé à enrichir la rotation en azote par un couvert de légumineuse et à contrôler le développement des adventices pendant et surtout après la phase d'association avec le blé est fortement corrélée à la biomasse produite par le couvert. Les expérimentations conduites en conditions biologiques et conventionnelles ont montré que la phase d'implantation du couvert était cruciale et déterminait en grande partie la biomasse produite pendant l'interculture. En effet, le couvert a peu de temps pour s'implanter au printemps avant de subir la concurrence du blé. Jusqu'à présent, les expérimentations conduites par l'ISARA-Lyon ont consisté à semer le couvert à la volée et à l'enfouir

grâce au passage de herse. Cette pratique visait à simplifier au maximum l'implantation et à limiter le besoin en matériel et les coûts pour l'agriculteur. Cependant, ce type d'implantation ne favorise pas une implantation rapide, et réduit considérablement le taux de levée. Il est alors conseillé de prendre en compte les pertes à la levée (de 20 à 35%) au moment du choix de la dose de semis. Un semis en bande ou en ligne peut également être envisagé pour améliorer cette implantation. Toutefois, l'absence de matériel adapté est actuellement un des freins au développement de ces techniques.

La crainte d'une concurrence trop forte du couvert pénalisant les performances du blé conduit à s'orienter vers une association en relais. Cependant, les expérimentations conduites ont montré que le développement du couvert associé de légumineuses fourragères à port ras (en deçà de 50 cm) était généralement très faible et peu susceptible de générer une concurrence significative. En conséquence, il peut être intéressant à réfléchir à des associations simultanées (semis des plantes compagnes en même temps que la culture principale) pour donner plus de temps au couvert de se développer avant une concurrence forte de la culture de blé.

Enfin, l'un des objectifs liés à l'implantation de ces espèces compagnes est de contrôler le développement des adventices, notamment durant l'interculture. Or, les travaux conduits sur ces associations en relais ont montré que le couvert est très efficace pour cela, à condition que le développement de la flore adventice au moment de son implantation soit maîtrisé. En effet, le couvert en se développant concurrence la flore d'autant plus efficacement que son développement est en avance sur celui de la flore adventice. Si cette flore est déjà bien développée lorsque le couvert s'implante, elle concurrencera trop fortement son développement et ne lui permettra pas de prendre le dessus.

3.2.3 Bien raisonner la fertilisation

Les travaux récents montrent clairement que l'implantation du couvert est trop tardive pour espérer un effet positif de l'azote fixé par la légumineuse sur les performances du blé associé. Le développement de la légumineuse est généralement limité au cours de l'association et l'azote fixé n'est pas valorisé par la culture de vente. En conclusion, cette technique d'association ne peut conduire à se passer d'une fertilisation de printemps du blé, elle permet par contre de limiter les apports d'azote sur la culture suivante. Cet apport de printemps est susceptible de pénaliser le développement de la légumineuse (concurrence avec le blé plus forte, développement éventuel des adventices plus important) et ainsi de limiter les services qu'elle fournit pour la suite de la rotation. Il est donc utile de limiter cette fertilisation, voire de la retarder pour laisser plus de temps à la légumineuse de se développer.

3.2.4 Raisonner la gestion du couvert pendant l'interculture

Un des enjeux est de faciliter la croissance du couvert pendant l'interculture puisque les services rendus sont très corrélés à la biomasse produite. L'efficacité de la légumineuse pour contrôler les adventices durant l'interculture est liée par exemple, à une biomasse produite allant au-delà de 2 t MS /ha. Ainsi, certains agriculteurs utilisant cette technique n'hésitent pas à arroser le couvert après la récolte en cas de conditions trop sèches en été. D'un point de vue économique, cette stratégie peut également s'avérer payante puisqu'elle permet potentiellement d'augmenter la quantité d'azote apportée par le couvert à la culture suivante et donc d'économiser l'apport d'engrais. Ces plantes compagnes peuvent avoir une utilisation fourragère dans certaines situations d'élevage.

3.2.5 Gérer le développement et le contrôle du couvert durant l'interculture

L'enfouissement d'une forte quantité de biomasse peut parfois s'avérer délicat. Il convient de caler les dates d'enfouissement en fonction des espèces et de leur capacité à restituer l'azote à la culture suivante. De même, il est parfois utile de détruire précocement les couverts dans les situations de faible développement et de salissement.

3.3 Ce que l'on ne sait pas encore

Les expériences passées permettent d'ébaucher des itinéraires techniques mais avec encore assez peu de précisions sur plusieurs points. :

- **La fertilisation azotée à adapter pour la culture en place ou pour la suivante.** Des connaissances sur les mécanismes de minéralisation et d'absorption de l'azote issu de la minéralisation des couverts, en des mulchs morts non enfouis, pour le colza associé permettraient d'aider à la décision de la fertilisation post-destruction. Des modifications de la rhizosphère suite à ces couverts associés sont également encore inconnues et demanderaient à être étudiées.
- **Les interactions de plusieurs éléments de l'itinéraire technique,** comme le travail du sol, le précédent, avec le choix des espèces, le type de mauvaises herbes et la dynamique de croissance du couvert associé. Or, cela permettrait de mieux raisonner la position de cet ITK dans la succession, d'adapter le choix des espèces aux milieux et au précédent cultural et aux types de mauvaises herbes majoritaires.
- **Le choix variétal des espèces de couverts** est également important et la variabilité au sein des espèces permettra de développer des variétés mieux adaptées à certains services, comme on peut déjà le constater sur les trèfles et les vesces. Mais beaucoup restent à faire.
- Enfin, nous disposons encore de peu d'éléments pour **choisir ces espèces compagnes et les assembler** pour bénéficier de ces services éco-systémiques. Une étude sur colza associé est en cours pour identifier des caractéristiques génériques des espèces, comme les traits fonctionnels, qui permettent d'aider à raisonner leur assemblage en accord avec le service éco-systémique rendu.

Références bibliographiques

- Abdin O.A., Coulman B.E., Cloutier D.C., Faris M.A., Smith D.L., 1997. Establishment, Development and Yield of Forage Legumes and Grasses as Cover Crops in Grain Corn in Eastern Canada. *J Agron Crop Sci.* 179(1), 19–27.
- Abdin O.A., Zhou X.M., Cloutier D., Coulman D.C., Faris M.A., Smith D.L., 2000. Cover crops and interrow tillage for weed control in short season maize (*Zea mays*). *Eur J Agron.* 12(2), 93–102.
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., David C., 2013. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability. *Field Crops Res.* 145, 78-87.
- Amossé C., Jeuffroy M.-H., Celette F., David C. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic crop production, *Eur. J. Agron, Soumis*
- Amossé C., 2013. Analyse expérimentale de l'effet de couverts de légumineuses associés en relais à un blé d'hiver, conduit en AB, sur les performances des cultures, la maîtrise des adventices et la dynamique de l'azote. Thèse de docteur AgroParisTech, Paris.137p.
- Becker K., Leithold G., 2008. Improvement of winter wheat baking quality in ecological cultivation by enlargement of row spacing and undersown intercrops. In: Neuhoff D., Halberg N., Alföldi T., Lockeretz W., Thommen A., Rasmussen I. A., Hermansen J., Vaarst M., Lueck L., Caporali F., Jensen H.H., Migliorini P., Willer H. (Eds). *Cultivating the future based on science. Volume 1: Organic Crop Production. 16th IFOAM Organic World Conference in Cooperation with the International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) and the Consorzio ModenaBio in Modena, Italy, 18-20 June, 2008 pp. 550-553*
- Bergkvist G., 2003. Effect of White Clover and Nitrogen Availability on the Grain Yield of Winter Wheat in a Three-Season Intercropping System. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 53 (3), 97–109. doi:10.1080/09064710310011953.

- Blaser B.C., Gibson L.R., Singer J.W., Jannink J.-L., 2006. Optimizing seeding rates for winter cereal grains and frost-seeded red clover intercrops. *Agron. J.* 98, 1041-1049.
- Blaser B.C., Singer J.W., Gibson L.R., 2011. Winter cereal canopy effect on cereal and interseeded legume productivity. *Agron. J.* 103, 1180-1185.
- Blackshaw R.E., Louis J.M., Moyer J.R., 2010. Suitability of Legume Cover Crop-Winter Wheat Intercrops on the Semi-Arid Canadian Prairies. *Canadian Journal of Plant Science* 90 (4), 479-488.
- Becker K., Leithold G., 2008. Improvement of winter wheat baking quality in ecological cultivation by enlargement of row spacing and undersown intercrops. In: D. Neuhoff, N. Halberg, T. Alföldi, W. Lockeretz, A. Thommen, I.A. Rasmussen, J. Hermansen, M. Vaarst, L. Lueck, F. Caporali, H. H. Jensen, Migliorini, P., Willer., H. (Eds.), *Second Scientific conference of the International Society of Organic Agriculture Research (ISO FAR), 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy*, pp. 550-553.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J., 2007. Undersowing Wheat with Different Living Mulches in a No-till System. II. Competition for Light and Nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development* 27 (4), 357-365. doi:10.1051/agro:2007017.
- Costello M.J., 1994. Broccoli Growth, Yield and Level of Aphid Infestation in Leguminous Living Mulches. *Biological Agriculture & Horticulture* 10 (3), 207-222.
- Duyck P.-F., Lavigne A., Vinatier F., Achard R., Okolle J.N., Tixier P., 2011. Addition of a new resource in agroecosystems: Do cover crops alter the trophic positions of generalist predators? *Basic Appl Ecol.* 2011 Feb;12(1), 47-55.
- Ghosheh H.Z., Bsoul E.Y., Abdullah A.Y., 2004. Utilization of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) as a Smother Crop in Field Corn (*Zea mays* L.). *J Sustain Agric.*, 25(1), 5-16.
- Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S., 2005. Facilitative Root Interactions in Intercrops. *Plant and Soil* 274 (1-2), 237-250. doi:10.1007/s11104-004-1305-1.
- Hauggaard-Nielsen H, Mundus S, Jensen ES. 2012. Grass-clover undersowing affects nitrogen dynamics in a grain legume-cereal arable cropping system. *Field Crops Res.* 2012 Sep;136:23-31.
- Hiltbrunner J., Streit B., Liedgens M., 2007. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover?. *Field Crops Research* 102 (3), 163-171. doi:10.1016/j.fcr.2007.03.009.
- Hiltbrunner J., Liedgens M., 2008. Performance of Winter Wheat Varieties in White Clover Living Mulch. *Biological Agriculture & Horticulture* 26 (1), 85-101.
- Hooks C.R.R., Hinds J., Zobel E., Patton T., 2013. Impact of Crimson Clover Dying Mulch on Two Eggplant Insect Herbivores. *Journal of Applied Entomology* 137 (3), 170-180. doi:10.1111/j.1439-0418.2012.01729.x.
- Hartl W., 1989. Influence of undersown clovers on weeds and on the yield of winter wheat in organic farming. *Agr. Ecosyst. Environ.* 27, 389-396.
- Hummel J.D., Dosedall L.M., Clayton G.W., Harker K.N., O'Donovan J.T., 2010. Responses of the parasitoids of *Delia radicum* (Diptera: Anthomyiidae) to the vegetational diversity of intercrops. *Biological Control* 55 (3), 151-158. doi:10.1016/j.biocontrol.2010.08.004.
- Ilnicki R., Enache A., 1992. Subterranean Clover Living Mulch-an Alternative Method of Weed-Control. *Agriculture Ecosystems & Environment* 40(1-4), 249-264. doi:10.1016/0167-8809(92)90096-T.
- Jamont M., Piva G., Fustec J., 2013. Sharing N Resources in the Early Growth of Rapeseed Intercropped with Faba Bean: Does N Transfer Matter? *Plant and Soil* 371 (1-2), 641-653. doi:10.1007/s11104-013-1712-2.
- Kandel H.J., Schneiter A.A., Johnson B.L., 1997. Intercropping Legumes into Sunflower at Different Growth Stages. *Crop Sci.* 37(5), 1532-1537.
- Kandel H.J., Johnson B.L., Schneiter A.A., 2000. Hard Red Spring Wheat Response Following the Intercropping of Legumes into Sunflower. *Crop Sci.* 40(3), 731-736

- Kruidhof H.M., Bastiaans L., Kropff M.J., 2008. Ecological Weed Management by Cover Cropping: Effects on Weed Growth in Autumn and Weed Establishment in Spring. *Weed Research* 48 (6), 492–502. doi:10.1111/j.1365-3180.2008.00665.x.
- Kwiecińska-Poppe E., Kraska P., Pałys E., 2009. The effect of intercropping on weed infestation of a spring barley crop cultivated in monoculture. *Acta Agrobot.*30; 62(1), 163–170.
- Liedgens M., Soldati A., Stamp P., 2004. Interactions of Maize and Italian Ryegrass in a Living Mulch System: (1) Shoot Growth and Rooting Patterns. *Plant and Soil* 262 (1-2), 191-203. doi:10.1023/B:PLSO.0000037041.24789.67.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 (mars): 43-62. doi:10.1051/agro:2007057.
- Malézieux E., 2012. Designing Cropping Systems from Nature. *Agronomy for Sustainable Development* 32 (1): 15–29. doi:10.1007/s13593-011-0027-z.
- Melissa M., Arcand J., Knight D., Farrell R.E., 2013. Estimating belowground nitrogen inputs of pea and canola and their contribution to soil inorganic N pools using ¹⁵N labeling. *Plant and Soil*, DOI: 10.1007/s11104-013-1626-z.
- Meynard J.M., Dedieu B., Bos J., 2012. Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic. Ika Darnhofer, David Gibon, Benoît Dedieu, Editors, 2012, Springer, 407-432
- Meynard A. Messéan, A. Charlier, F. Charrier, M. Farès, M. Le Bail, M.B. Magrini, I. Savini, 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p.
- Mutch D.R., Martin T.E., Kosola K.R., 2003. Red clover (*Trifolium pratense*) suppression of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technol.* 17, 181-185.
- Parr C.L., Robertson H.G., Biggs H.C., Chown S.L., 2004. Response of African savanna ants to long-term fire regimes. *Journal of Applied Ecology* 41 (4), 630–642.
- Primot S., Valantin-Morison M., Makowski D., 2006. « Predicting the risk of weed infestation in winter oilseed rape crops ». *Weed Research* 46 (1): 22-33.
- Teasdale J.R., Abdul-Baki A.A., Park Y.B., 2008. Sweet Corn Production and Efficiency of Nitrogen Use in High Cover Crop Residue. *Agronomy for Sustainable Development* 28 (4), 559–565. doi:10.1051/agro:2008029.
- Thériault F., Stewart K.A., Seguin P., 2009. Use of Perennial Legumes Living Mulches and Green Manures for the Fertilization of Organic Broccoli. *Int J Veg Sci.* 15(2), 142–157.
- Theunissen J., 1997. Application of Intercropping in Organic Agriculture. *Biological Agriculture & Horticulture* 15 (1-4), 251–259.
- Theunissen J., Booij C.J.H., Lotz L.A.P., 1995. Effects of intercropping white cabbage with clovers on pest infestation and yield. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 74 (1), 7–16.
- Thiessen Martens J.R., Hoepfner J.W., Entz M.H., 2001. Legume cover crops with winter cereals in Southern Manitoba: Establishment, productivity, and microclimate effects. *Agron. J.* 93, 1086-1096.
- Thorsted M.D., Weiner J., Olesen J.E., 2006. Above- and below-Ground Competition between Intercropped Winter Wheat *Triticum aestivum* and White Clover *Trifolium repens*: Competition between Winter Wheat and White Clover. *Journal of Applied Ecology* 43 (2), 237–245. doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01131.x.
- Schott C., Mignolet C., Meynard J.M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL* 17, 1-16
- Uchino H., Iwama K., Jitsuyama Y., Yudate T., Nakamura S., 2009. Yield losses of soybean and maize by competition with interseeded cover crops and weeds in organic-based cropping systems. *Field Crops Res.*, 113(3), 342–251.

Vandermeer J., van Noordwijk M., Anderson J., Ong C., Perfecto I., 1998. Global change and multi-species agroecosystems: Concepts and issues. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 67 (1), 1-22. doi:10.1016/S0167-8809(97)00150-3.

Valantin-Morison M., Meynard J.M., 2008. Yield variability of Organic Winter Oil Seed Rape (WOSR) in France: a diagnosis on a network of farmers fields, *Agronomy for Sustainable Development*, 28 (2008) DOI: 10.1051/agro:2008026.

Vyn T.J., Faber J.G., Janovicek K.J., Beauchamp E.G., 2000. Cover Crop Effects on Nitrogen Availability to Corn following Wheat. *Agron. J.* 92, 915-924.

Wezel A., Casagrande M., Celette, F, Vian J.V., Ferrer A., Peigné A. (published online). 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. DOI 10.1007/s13593-013-0180-7